

Р. П. ПРОСУЖИХ

РАСЧЕТ ОДНОФАЗНЫХ КОРАБЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Руководство к расчетно-графическим работам

ВОЕННО-МОРСКОЙ ФЛОТ

1964

Р. П. ПРОСУЖИХ

РАСЧЕТ ОДНОФАЗНЫХ КОРАБЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Руководство к расчетно-графическим работам

ВОЕННО-МОРСКОЙ ФЛОТ
1964

ГОС. ПУБЛИЧНАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА ССОР

ПРЕДИСЛОВИЕ

Расчет силовых трансформаторов небольшой мощности с воздушным охлаждением, которые находят применение на кораблях, принципиально не отличается от расчета крупных трансформаторов, однако имеет ряд особенностей, обусловленных конструкцией и условиями работы. Кроме того, учебный характер проектирования, выполняемого курсантами, требует значительного сокращения объема расчета и времени, затрачиваемого на его выполнение. Эти обстоятельства затрудняют использование опубликованных в литературе методик расчета трансформаторов.

Настоящее пособие составлено в соответствии с программой по электрическим машинам переменного тока, в которой предусмотрено выполнение расчетно-графического задания по расчету однофазного корабельного трансформатора. Оно предназначено для курсантов электротехнической специальности в качестве руководства при выполнении расчетно-графических работ, а также при дипломном проектировании.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТРАНСФОРМАТОРА

1. Исходные данные для расчета

Число фаз m .

Номинальная мощность вторичной обмотки S_2 *кВа*.

Первичное номинальное напряжение U_1 *в*.

Вторичное номинальное напряжение U_2 *в*.

Коэффициент мощности нагрузки $\cos \varphi_2$.

Частота сети f *гц*.

Характер нагрузки.

Класс изоляции.

Тип магнитной системы.

Способ охлаждения.

Исполнение корпуса.

2. Основные сведения по устройству трансформаторов

В настоящее время на кораблях применяются однофазные трансформаторы типа ОСВ или ОСЗ (однофазный, сухой, водозащищенный или брызгозащищенный). Трансформаторы мощностью от 0,25 до 2 *кВа* выполняются с витым разрезным сердечником (рис. 1), мощностью от 3 до 10 *кВа* — стержневого типа с двумя катушками (рис. 2). Трансформатор состоит из бака и съемной части, в которую входят магнитопровод M , обмотка высокого напряжения BH , обмотка низкого напряжения HN и доска зажимов (на рис. 1, 2 доска зажимов и другие конструктивные элементы не показаны). Магнитопровод трансформатора с витым сердечником изготавливают в виде двух спиральных сердечников, намотанных из стальной ленты марки Э310, Э320 или Э330 (холоднокатаная сталь высокой проницаемости). Сердечники скреплены между собой при помощи четырех стоек-уголков. Магнитопровод стержневого типа набран из тонких пластин стали тех же марок в виде вертикальных стержней, соединенных сверху и снизу ярмами. Пластины стянуты изолированными шпильками между прессующими щеками. На магнитопроводе закреплена доска зажимов, а также

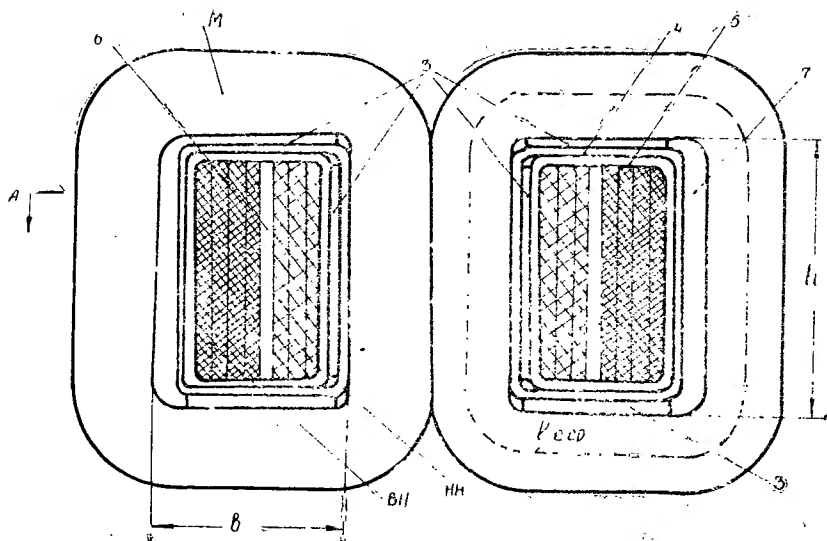
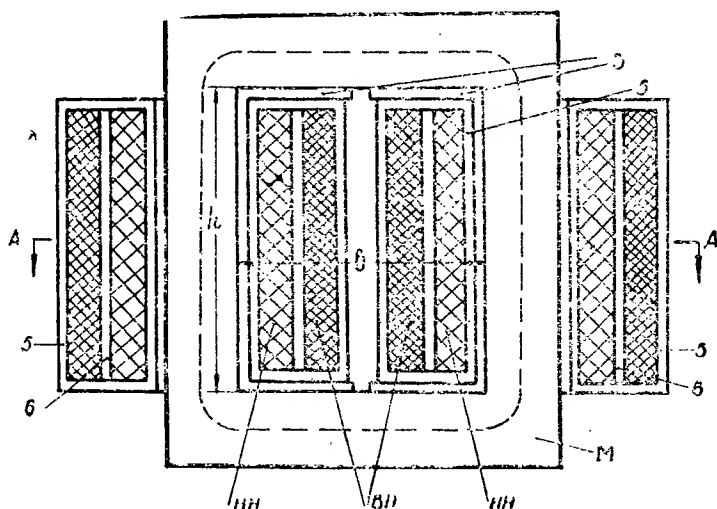


Рис. 1. Трансформатор с витым сердечником.

скобы, при помощи которых выемная часть фиксируется в баке. Бак трансформатора — сварной из листовой стали. Он имеет необходимое количество сальников для ввода кабелей, а также лапы для крепления трансформатора к палубе или переборке.



Сечение по АА

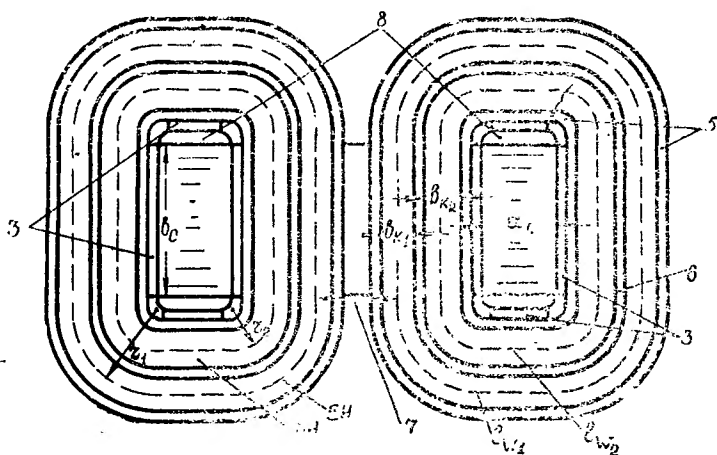


Рис. 2. Стержневой трансформатор.

Обмотки трансформатора выполнены в виде слоевых прямоугольных катушек, намотанных concentрически одна поверх другой. Обмотку *ВН* располагают снаружи, что упрощает вывод отвлений для регулировки напряжения. Для трансформаторов мощностью свыше 3 кВа между слоями катушек должны быть предусмотрены охлаждающие каналы. В качестве изоляции обмоток от железа, изоляции между обмотками *ВН* и *НН*, а также между слоями обмоток применяют стеклоткань и стеклотекстолит. Витки имеют стеклянную изоляцию на основе теплостойких лаков (провод марки ПСД и ПСДК).

3. Определение токов

Проектирование трансформатора, как и всякой другой электрической машины, представляет собой весьма сложную задачу, поскольку число неизвестных больше числа уравнений, связывающих эти неизвестные. Обычно некоторыми неизвестными задаются на базе уже построенных трансформаторов, а расчет проводят в нескольких вариантах, чтобы иметь возможность выбрать из них самый выгодный. Опыт проектирования показывает, что для создания наиболее экономичного трансформатора, обладающего минимальным весом и габаритами, необходимо правильно выбрать к. п. д. и отношение потерь в меди к потерям в стали, а также отношение веса стали к весу меди.

Можно показать, что к. п. д. трансформатора будет максимальным, если переменные и постоянные потери равны друг другу. К постоянным потерям P_0 относят потери в стали и потери в меди первичной обмотки от тока холостого хода. Переменные потери P_k включают в себя потери, зависящие от нагрузки. Обычно корабельные трансформаторы работают при нагрузках 70÷80% от номинальной, поэтому для номинальной мощности отношение потерь составляет

$$\xi = \frac{P_0}{P_k} \approx 1,5 \div 1,9.$$

Отношение веса стали к весу меди может находиться в пределах

$$\alpha = \frac{G_c}{G_m} \approx 1,5 \div 5,0.$$

Для маломощных трансформаторов стоимость меди выше стоимости стали, поэтому у береговых трансформаторов величина α обычно ближе к верхнему пределу. В корабельных трансформато-

рах решающими факторами являются вес и габариты, поэтому α следует выбирать не больше $2,0 \div 2,5$.

Величина к. п. д. трансформатора находится в пределах $0,92 \div 0,97$ и предварительно может быть выбрана по рис. 3.

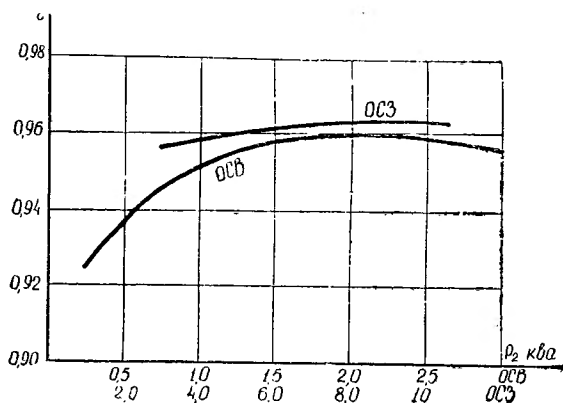


Рис. 3. Зависимость к. п. д. от мощности трансформатора.

Ток вторичной обмотки

$$I_2 = \frac{S_2}{U_2} 10^3 \text{ а.}$$

Ток первичной обмотки

$$I_1 = \frac{S_2 \cos \varphi_2}{U_1 \eta_1 \cos \varphi_1} 10^3 \text{ а,}$$

где

$$\cos \varphi_1 = \frac{I_{1a}}{\sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}}.$$

Активную и реактивную составляющие тока первичной обмотки можно определить по формулам

$$I_{1a} = \frac{S_2 \cos \varphi_2}{\eta_1 U_1} 10^3 \text{ а;}$$

$$I_{1p} = I_{1a} + \frac{S_2 \sin \varphi_2}{\eta_1 U_1} 10^3 \text{ а.}$$

Предельное значение намагничивающего тока I_μ обусловлено в основном величиной индукции в сердечнике трансформатора и предварительно может быть выбрано по рис. 4, где оно показано в процентах от номинальной величины тока I_{1a} .

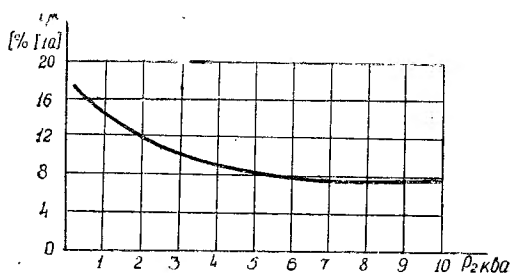


Рис. 4. Зависимость тока намагничивания от мощности.

4. Выбор индукции в сердечнике и плотности тока в обмотках

Выбор индукции в стержнях и ярме зависит от многих факторов. С увеличением индукции уменьшается число витков обмотки и, следовательно, расход меди. В то же время с ростом индукции увеличивается ток холостого хода, а значит и сечение, и вес меди обмотки. Оптимальное значение индукции является таким ее значением, при котором возрастание веса меди за счет увеличения намагничивающего тока станет равным экономии меди за счет увеличения индукции.

Для стержневых трансформаторов величина индукции может быть принята равной

$$B_c = 1,2 \div 1,4 \text{ тл.}$$

В трансформаторах с витым сердечником

$$B_c = 1,3 \div 1,55 \text{ тл.}$$

В трансформаторах повышенной частоты (200 ÷ 400 гц) индукция в стержне должна составлять не более 0,5 ÷ 0,7 тл, так как для более высоких значений резко увеличиваются потери в стали и нагрев.

В некоторых случаях для стержневых трансформаторов величину индукции в ярме выбирают меньше, чем в стержне. Это позволяет уменьшить значение намагничивающего тока, но требует увеличения сечения ярма и усложняет расчет.

Величина плотности тока зависит от условий охлаждения, класса изоляции, конструкции и мощности трансформатора. У более

мощных трансформаторов условия охлаждения хуже, поэтому и плотность тока должна быть меньше. Наличие каналов для охлаждения сердечника и обмоток позволяет несколько увеличить плотность тока. Предварительно плотность тока для первичной δ_1 и для вторичной δ_2 обмоток может быть принята в пределах

$$\delta_1 \approx \delta_2 = 1,2 \div 3,0 \text{ а/мм}^2.$$

5. Определение сечений стержня и яра сердечника

Поперечное сечение стержня определяют по формуле

$$S_c = C \sqrt{\frac{U_1 I_1 \alpha 10^2}{f B_c \delta_1}} \text{ см}^2,$$

где постоянный коэффициент C равен 0,6 для стержневых и 0,7 для трансформаторов с витым сердечником.

Поперечное сечение яра трансформатора стержневого типа может быть принято

$$S_{\text{я}} = S_c.$$

Для трансформаторов с витым сердечником

$$S_{\text{я}} = \frac{S_c}{2}.$$

Полные поперечные сечения стержня и яра с учетом коэффициента заполнения сечения сталью k_3

$$S'_c = \frac{S_c}{k_3}; \quad S'_{\text{я}} = \frac{S_{\text{я}}}{k_3}.$$

$$k_3 = 0,92 \text{ при толщине листа } \Delta = 0,5 \text{ мм};$$

$$k_3 = 0,90 \text{ при толщине листа } \Delta = 0,35 \text{ мм}.$$

Форму поперечного сечения стержня обычно выбирают прямоугольной. В этом случае размеры сечения стержня (рис. 5)

$$b_c = (1,1 \div 1,5) a_c \quad \text{см};$$

$$a_c = \sqrt{\frac{S'_c}{(1,1 \div 1,5)}} \quad \text{см}.$$

Высота ярма стержневого трансформатора

$$h_{\text{я}} = \frac{S'_{\text{я}}}{b_c} \text{ см.}$$

Высота ярма трансформатора с витым сердечником (рис. 6)

$$h_{\text{я}} = \frac{a_c}{2} \text{ см.}$$

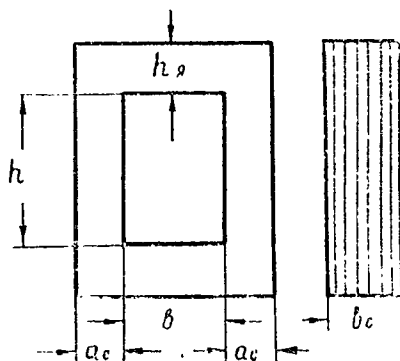


Рис. 5. Размеры стержневого магнитопровода.

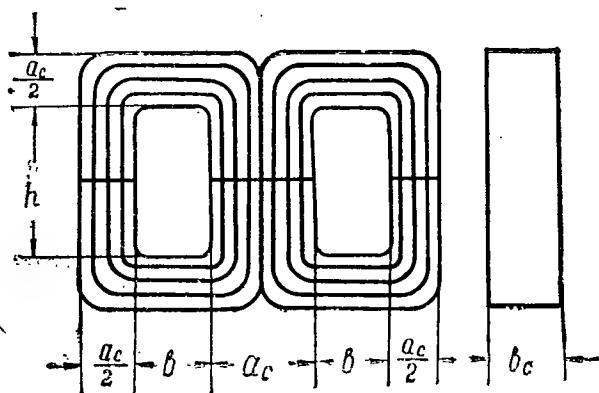


Рис. 6. Размеры ленточного броневого магнитопровода.

6. Определение числа витков и сечения проводов обмоток

Для определения числа витков первичной обмотки w_1 можно воспользоваться формулой э. д. с. трансформатора

$$U_1 \approx E_1 - 4,44 f w_1 \Phi_m,$$

тогда

$$w_1 = \frac{U_1 10^4}{4,44 f B_c S_c}.$$

Напряжение на один виток первичной обмотки при холостом ходе

$$e_w = \frac{U_1}{w_1} \text{ в.}$$

Напряжение на один виток вторичной обмотки можно принять равным напряжению на один виток первичной обмотки, так как обе обмотки обтекаются одним и тем же магнитным потоком. Изменением этой величины при нагрузке для упрощения расчета можно пренебречь.

Число витков вторичной обмотки

$$w_2 = \frac{U_2}{e_w}.$$

При определении числа витков значения w_1 и w_2 округляют до ближайшего целого числа.

Напряжение на вторичной обмотке при номинальной нагрузке

$$U_{2н} = e_w w_2 - \Delta U,$$

где

$$\Delta U = \frac{\Delta U \% \cdot U_1}{100} \text{ в.}$$

Величину падения напряжения трансформатора $\Delta U \%$ можно определить по рис. 7.

Таким образом, заданным параметрам трансформатора соответствует вполне определенное число витков обмоток. Увеличение числа витков нецелесообразно, так как при этом увеличиваются размеры и вес трансформатора, ухудшается использование активных материалов. Уменьшение числа витков вызывает значительное увеличение тока холостого хода, потерь в меди и температуры нагрева обмоток.

В корабельных трансформаторах первичная обмотка имеет 3-4 ответвления для регулирования величины напряжения. При-

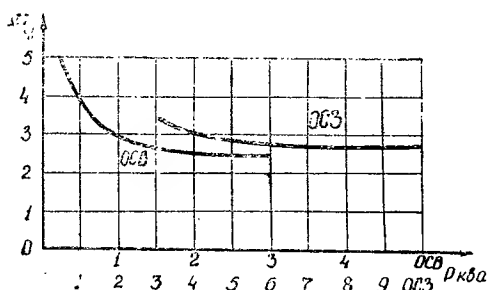


Рис. 7. Падение напряжения трансформатора при номинальной нагрузке.

мерные значения ступеней регулирования напряжения в зависимости от заданного номинального напряжения можно принять следующими:

$$\begin{array}{llll}
 U_1 = 400 \text{ в}; & U'_1 = 390 \text{ в}; & U''_1 = 380 \text{ в}; & U'''_1 = 370 \text{ в}; \\
 U_1 = 230 \text{ в}; & U'_1 = 225 \text{ в}; & U''_1 = 220 \text{ в}; & U'''_1 = 215 \text{ в}; \\
 U_1 = 133 \text{ в}; & U'_1 = 129 \text{ в}; & U''_1 = 125 \text{ в}; & U'''_1 = 121 \text{ в}.
 \end{array}$$

Число витков на каждую ступень легко определить, используя значение напряжения на виток e_w , по формуле

$$w'_1 = \frac{U_1 - U'_1}{e_w}.$$

После определения числа витков необходимо разработать схему соединений выводов обмоток в соответствии с заданием и рис. 8, на котором представлены типичные принципиальные схемы обмоток однофазных трансформаторов.

Обмотки ВН и НН трансформаторов, имеющих магнитопроводы стержневого типа, делятся на две части с одинаковым числом витков, равным половине числа витков всей обмотки, и располагаются на обоих стержнях каждая. Половины обмоток соединяют между собой в зависимости от величины номинального тока либо последовательно, либо параллельно. В последнем случае сечение меди обмотки следует определять по току, равному половине номинального.

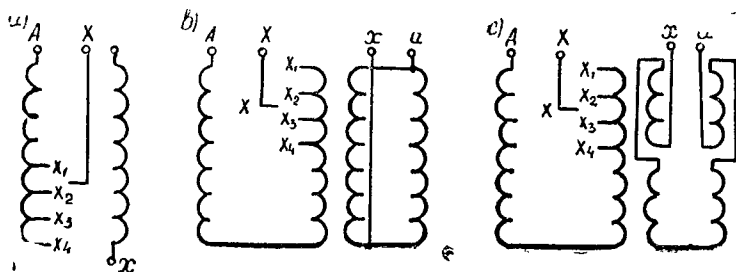


Рис. 3. Схемы обмоток однофазных трансформаторов:

- а) с витым сердечником;
- б) стержневых при $U_2 = 25$ в;
- в) стержневых при $U_2 > 25$ в.

По выбранным ранее значениям тока и плотности тока в обмотках можно определить поперечные сечения проводников

$$q_1 = \frac{I_1}{\delta_1} \text{ мм}^2; \quad q_2 = \frac{I_2}{\delta_2} \text{ мм}^2.$$

Окончательные значения поперечных сечений и размеров проводников обмоток устанавливают по табл. 1, 2, 3 с учетом следующих рекомендаций: если $q < 10 \text{ мм}^2$, то выбирают круглую медь, если $q > 10 \text{ мм}^2$, — прямоугольную. При $q > 25 \text{ мм}^2$ следует предусмотреть несколько параллельных ветвей обмотки, что необходимо для уменьшения добавочных потерь.

Прямоугольная медь наматывается на стержень плашмя, то есть большей стороной параллельно поверхности стержня. Если сечение проводника большое и предусмотрено несколько параллельных ветвей обмотки, то они наматываются вместе, образуя как бы один секционированный проводник, состоящий из нескольких частичных. По технологическим соображениям число частичных проводников обычно выбирают четным.

Тип изоляции проводов выбирают в соответствии с заданием по табл. 4, 5. Расчетную толщину изоляции необходимо принять на 0,1 мм больше указанной в таблицах, чтобы учесть неплотность укладки. Выбранные размеры показывают с учетом изоляции и без нее

$$q_1 = \dots \text{ мм}^2; \quad \frac{d_1}{d_{\text{из}}} = \frac{\dots}{\dots} \text{ или } \frac{a_1 \cdot b_1}{a_{\text{из}} \cdot b_{\text{из}}} = \frac{\dots}{\dots} \frac{\text{мм}}{\text{мм}};$$

$$q_2 = \dots \text{ мм}^2; \quad \frac{d_2}{d_{\text{из}}} = \frac{\dots}{\dots} \text{ или } \frac{a_2 \cdot b_2}{a_{\text{из}} \cdot b_{\text{из}}} = \frac{\dots}{\dots} \frac{\text{мм}}{\text{мм}}.$$

После выбора размеров меди необходимо уточнить значения плотности тока в обмотках

$$\delta_1 = \frac{I_1}{q_1}; \quad \delta_2 = \frac{I_2}{q_2} \text{ а'м.м}^2.$$

Т а б л и ц а 1

Размеры и сечения круглого медного провода

<i>d</i> мм	<i>q</i> мм ²	<i>d</i> мм	<i>q</i> мм ²
0,15	0,0175	1,25	1,23
0,20	0,0314	1,30	1,33
0,29	0,0661	1,35	1,43
0,31	0,0755	1,45	1,65
0,35	0,0962	1,50	1,77
0,38	0,1134	1,56	1,91
0,41	0,132	1,68	2,22
0,51	0,204	1,74	2,38
0,55	0,238	1,81	2,57
0,59	0,273	1,88	2,78
0,61	0,322	1,95	2,99
0,69	0,374	2,10	2,46
0,74	0,430	2,26	4,01
0,80	0,503	2,44	4,68
0,86	0,581	2,63	5,43
0,93	0,679	2,83	6,29
1,00	0,785	3,05	7,31
1,08	0,916	3,28	8,45
1,12	0,985	3,53	9,79
1,16	1,06		

Т а б л и ц а 2

Двусторонняя толщина изоляции проводов (*d*_{из}—*d*)

Марка провода	Диаметр круглой проволоки <i>d</i> мм				Меньшая сторона сечения прямоугольной проволоки <i>a</i> мм		
	0,21—0,49	0,51—0,93	1,0—2,1	2,23—5,2	1,95—0,96	2,1—3,8	4,1—5,5
ПСД	0,23	0,25	0,27	0,33	0,27	0,33	0,40
ПСДК	0,23	0,25	0,27	0,33	0,27	0,33	0,40
ПДА	—	—	0,30	0,35	0,35	0,40	0,40
ПЭТСО	0,20	0,22	0,24	—	—	—	—
ПЭТКСО	0,16	0,18	0,20	—	—	—	—

Размеры и сечения прямоугольного медного провода q мм²

$\frac{a \text{ мм}}{b \text{ мм}}$	1,35	1,56	1,68	1,81	2,1	2,44	2,63	2,83	3,05	3,28	3,8	4,4
4,4	5,73	6,65	7,18	7,75	8,76	10,2	11,1	12,0	12,9	13,9	15,1	18,5
5,1	6,68	7,75	8,36	9,02	10,2	11,9	12,9	13,9	15,1	16,2	18,9	21,5
5,5	7,22	8,37	9,03	9,75	11,1	12,9	14,0	15,1	16,3	17,5	20,4	23,3
5,9	7,76	8,99	9,7	10,5	11,9	13,9	15,0	16,2	17,5	18,9	21,9	25,1
6,4	8,43	9,77	10,6	11,4	12,9	15,1	16,3	17,6	19,0	20,5	23,8	27,3
6,9	—	10,6	11,4	12,3	14,0	16,3	17,7	19,0	20,6	22,1	25,7	29,5
7,4	—	11,3	12,6	13,3	15,0	17,6	19,0	20,4	22,1	23,6	27,6	31,7
8,0	—	12,3	13,2	14,4	16,3	19,0	20,5	22,1	23,9	25,7	29,9	34,3
9,3	—	14,3	15,4	16,6	19,0	22,2	24,0	25,8	27,9	30,0	34,8	40,0
10,0	—	—	16,6	17,9	20,5	23,9	25,8	27,8	30,0	32,3	37,5	43,1
10,8	—	—	—	19,3	22,2	25,9	27,9	30,1	32,4	34,9	40,5	46,6

Классификация электроизоляционных материалов

Обозначение класса изоляции	Допустимая температура, °C	Краткая характеристика
У	90	Непропитанные волокнистые материалы из целлюлозы и шелка
А	105	То же, но с пропиткой
Е	120	Некоторые синтетические органические пленки
В	130	Материалы на основе слюды, асбеста, стекловолокна с пропиткой органическими составами
F	155	То же с пропиткой синтетическими составами
Н	180	То же с пропиткой кремнийорганическими составами
С	Более 180	Слюда, керамические материалы, кварц, стекло без пропитки или с пропиткой неорганическими или элементарно-органическими составами

Таблица 5

Некоторые марки изолированных проводов

Марка провода	Максимально допустимая температура °C	Характеристика провода
ПЭТСО	125	Провод эмалированный с одним слоем стекловолокна, пропитанный глифталевым лаком
ПЭТҚСО	180	То же, но с пропиткой кремнийорганическим лаком
ПСД	150	Провод с двумя слоями стекловолокна, пропитанный глифталевым лаком
ПСДК	180	Провод с двумя слоями стекловолокна, пропитанный кремнийорганическим лаком
ПДА	130	Провод с одним слоем дельта-асбестовой изоляции, пропитанный нагревостойким лаком

7. Укладка обмотки на стержнях

Большое влияние на расход меди и стали, на величину намагничивающего тока I_μ оказывает форма окна сердечника. Очень высокое окно ведет к увеличению расхода стали и тока I_μ . Широкое и низкое окно увеличивает расход меди. Опыт проектирования показы-

вает, что оптимальное отношение высоты окна h к ширине окна b (см. рис. 5, 6) лежит в пределах $k = \frac{h}{b} = 1,4 \div 2,1$ для трансформаторов с витым сердечником и $k = 2,5 - 3,2$ для стержневых трансформаторов.

Предварительно значение h можно определить по формуле

$$h = \sqrt{k \frac{q_1 w_1 + q_2 w_2}{100 k_0}} \text{ см},$$

где $k_0 = 0,2 \div 0,3$ — коэффициент заполнения окна сердечника обмоткой, а q_1 и q_2 — полные поперечные сечения обмоток, равные сумме сечений всех параллельных ветвей и секций соответствующих обмоток.

Ширина окна сердечника

$$b = \frac{h}{k} \text{ см}.$$

При укладке обмоток в окне сердечника следует иметь в виду следующее. Для трансформаторов с витым сердечником обмотки *III* и *ВII* укладываются концентрически, одна поверх другой, без вентиляционных каналов. Обмотки *ВII* и *III* стержневых трансформаторов располагаются на обоих стержнях каждая. Соединение половин обмоток между собой в зависимости от конструкции либо последовательное, либо параллельное. При мощности 3 кВА и более между слоями по узким сторонам катушек должны быть предусмотрены вентиляционные каналы шириной 1,0 ÷ 1,5 см. Принцип конструкции обмоток и толщина изоляционных промежутков показаны на рис. 1 и 2, а также в табл. 6.

Число витков обмоток в одном слое для трансформатора с витым сердечником

$$n_i = \frac{h - \Delta h}{d_{\text{из}}}.$$

То же для стержневого

$$n_i = \frac{h - \Delta h}{b_{\text{из}}}.$$

Число слоев обмоток трансформатора с витым сердечником

$$m_i = \frac{w_i}{n_i},$$

Укладка обмоток трансформатора

Условное обозначение	Наименование обмоток и изоляционных промежутков	Трансформатор с витым сердечником		Стержневой трансформатор	
		по высоте окна, мм	по ширине окна, мм	по высоте окна, мм	по ширине окна, мм
<i>ВН</i>	Размеры обмотки <i>ВН</i> с учетом межслоевой изоляции	$h_{к1} = n_1 d_{1из}$	$b_{к1} = m_1 (d_{1из} + 0,1)$	$h_{к1} = n_1 b_{1из}$	$2b_{к1} = 2m_1 (a_{1из} + 0,15)$
<i>НН</i>	Размеры обмотки <i>НН</i> с учетом межслоевой изоляции	$h_{к1} = n_2 d_{2из}$	$b_{к1} = m_2 (d_{2из} + 0,1)$	$h_{к2} = n_2 b_{2из}$	$2b_{к1} = 2m_1 (a_{2из} + 0,15)$
1	Зазор на укладку $\delta_3 = 2$ мм (уплотняется стеклотекстолитовой прокладкой)	—	$\delta_3 = 2,0$	—	$2\delta_3 = 2 \cdot 2,0$
2	Зазор на разбухание изоляции от пропитки	$\delta_p = 1,2$	$\delta_p = 1,2$	$\delta_p = 2,0$	$\delta_p = 1,0$
3	Прокладка стеклотекстолитовая $\delta_n = 3,0$ мм	$2\delta_n = 2 \cdot 3,0$	$2\delta_n = 2 \cdot 3,0$	$2\delta_n = 2 \cdot 3,0$	$2\delta_n = 2 \cdot 3,0$
4	Бандаж (стеклотента 0,2 мм сплошнхлеста) $\delta_b = 0,4$ мм	$2\delta_b = 2 \cdot 0,4$	$2\delta_b = 2 \cdot 0,4$	—	—
5	Наружная изоляция (стеклоткань) $\delta_n = 1,0$ мм	$2\delta_n = 2 \cdot 1,0$	$2\delta_n = 2 \cdot 1,0$	$2\delta_n = 2 \cdot 1,0$	$4\delta_n = 4 \cdot 1,0$
6	Изоляция между обмотками (стеклоткань) $\delta_o = 1,5$ мм	—	$\delta_o = 1,5$	—	$2\delta_o = 2 \cdot 1,5$
7	Зазор между обмоткой и ярмом или между обмотками соседних стержней	$2\delta_{св} = 2 \cdot 5,0$	$\delta_{св} = 6,5$	$2\delta_{св} = 2 \cdot 10,0$	$\delta_{св} = 12,0$
8	Клин (стеклотекстолит) $\delta_{кл} = 5$ мм Общая толщина изоляции обмотки	—	—	—	—
		$\Delta h = 20,0$	$\Delta b = 20,0$	$\Delta h = 30,0$	$\Delta b = 30,0$

стержневого (на один стержень)

$$m_i = \frac{w_i}{2n_i}.$$

Здесь i — порядковый номер обмотки.

Полученные выше значения числа витков в одном слое n_i и число слоев обмоток m_i при укладке обмоток на стержнях следует округлить до ближайшего большего целого числа, поскольку каждый неполный слой при определении размеров окна должен быть учтен как полный.

При пользовании табл. 6 следует иметь в виду следующее:

1. Условные обозначения изоляционных промежутков согласованы с рис. 1 и 2.

2. Для определения размеров обмоток BH и HH в таблице записаны формулы, правые части которых содержат диаметр круглого изолированного проводника $d_{из}$ для трансформаторов с витым сердечником или размеры прямоугольного изолированного проводника $a_{из}$ и $b_{из}$ для стержневых трансформаторов. Такое распределение формул применительно к типам трансформаторов не является обязательным. Выбор конфигурации сечения проводника определяется номинальным током обмотки и в соответствии с этим для определения размеров обмотки необходимо использовать формулы табл. 6. Например, если для трансформатора с витым сердечником обмотка BH выполняется из круглой меди, а обмотка HH из прямоугольной, то размеры обмотки BH определяются по диаметру $d_{1из}$, а размеры обмотки HH по размерам $a_{2из}$ и $b_{2из}$.

После укладки обмотки необходимо уточнить размеры окна h и b , проверить значение коэффициента формы окна.

Для проверки трансформатора по нагреву в самом простейшем случае достаточно определить величину линейной нагрузки AS

$$AS = \frac{w_1 \cdot I_1 + w_2 \cdot I_2}{n_c \cdot h_k} \text{ а/см},$$

где $h_k = h - \Delta h$ — высота обмоток, см;

n_c — число стержней, несущих обмотки.

Значение AS должно находиться в следующих пределах:

$$AS \leq 150 \text{ а/см для } S_2 \leq 0,5 \text{ ква};$$

$$AS \leq 300 \text{ а/см для } S_2 > 0,5 \text{ ква}.$$

8. Определение веса активных материалов

Предварительно необходимо определить среднюю длину витка обмоток трансформатора по формулам

$$l_{w1} = 2(a_c + b_c + 2\delta_{кз} + 2\delta_3 + \pi r_1) \text{ см};$$

$$l_{w2} = 2(a_c + b_c + 2\delta_{кз} + 2\delta_3 + \pi r_2) \text{ см}.$$

В этих формулах значение r_1 и r_2 необходимо определить по рис 1 и 2, с учетом данных табл. 6

$$r_1 = \frac{b_{к1}}{2} + \delta_0 + b_{к2} + \delta_n + \delta_n + \delta_6 + \delta_p \text{ см};$$

$$r_2 = \frac{b_{к2}}{2} + \delta_n + \delta_n + \delta_6 + \frac{\delta_p}{2} \text{ см}.$$

Вес меди обмоток

$$G_{м1} = 8,9 \cdot w_1 \cdot q_1 \cdot l_{w1} \cdot 10^{-5} \text{ кг};$$

$$G_{м2} = 8,9 \cdot w_2 \cdot q_2 \cdot l_{w2} \cdot 10^{-5} \text{ кг};$$

$$G_m = G_{м1} + G_{м2} \text{ кг}.$$

Вес стали трансформатора с витым сердечником

$$G_c = 7,65 \cdot S_c \cdot l_{ср} \cdot 10^{-3} \text{ кг},$$

где $l_{ср}$ — средняя длина витка магнитопровода, которую приближенно можно определить по формуле

$$l_{ср} = 2(h + b) + a_c \text{ см}.$$

Для стержневых трансформаторов вес стали удобно определять по такому выражению:

$$G_c = G_{сз} + G_{сн} = 2 \cdot 7,65 [S_c h + S_n (b + 2a_c)] 10^{-3} \text{ кг}.$$

Общий вес трансформатора

$$G = (G_c + G_m) D.$$

Коэффициент D учитывает вес конструктивных элементов. Значение коэффициента D зависит от исполнения и мощности трансформатора и может быть выбрано в следующих пределах:

$D = 1,7 \div 3,2$ — для водозащищенных трансформаторов с витым сердечником;

$D = 1,9 \div 2,5$ — то же для стержневых;

$D = 1,5 \div 1,9$ — для брызгозащищенных стержневых трансформаторов.

Большие значения следует выбирать для трансформаторов меньшей мощности.

После определения весов активных материалов необходимо проверить значение отношения $\alpha = \frac{G_c}{G_m}$, которое должно находиться в рекомендованных выше пределах.

9. Определение потерь и к. п. д.

Потери в меди обмотки при 75°C можно определить, воспользовавшись выражением

$$P_{mi} = 3 \cdot \delta_i^2 \cdot G_{mi} \text{ вт},$$

где δ_i — плотность тока в обмотке, а/мм^2 ;

G_{mi} — вес меди данной обмотки, кг ;

$\beta = 2,4$ — удельные потери при температуре нагрева 75°C, $\text{вт} \cdot \text{а/кг} \cdot \text{мм}$.

Потери вычисляют для каждой обмотки отдельно, а затем результаты складывают

$$P_m = P_{m1} + P_{m2}.$$

Потери в стали сердечника

$$P_c = p_c \left(\frac{B_c}{1,0} \right)^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} (G_{cc} + G_{cy}) \text{ вт}.$$

Здесь p_c — удельные потери в стали при $f = 50 \text{ гц}$ и $B_c = 1,0 \text{ тл}$ (см. табл. 7) вт/кг .

Если при определении потерь в стали используется коэффициент удельных потерь p_c , вычисленный для других значений частоты f и индукции B_c (см. табл. 7), то эти значения необходимо учесть в формуле потерь, подставив их в знаменатели соответствующих членов.

Дополнительные потери в трансформаторе с целью упрощения расчета можно не учитывать.

Коэффициент полезного действия трансформатора при номинальной нагрузке

$$\eta = \frac{S_2 \cos \varphi_2}{S_2 \cos \varphi_2 + P_c + P_m}.$$

В этой формуле мощность S_2 должна быть указана на ва .

Основные свойства электротехнических сталей

Марка стали	ГОСТ 802-54	ГОСТ 802-41	Толщина листов, мм	Размер листов, см	Удельный вес, г/см ³	Удельное сопротивление, ом/см	Удельные потери вт/кг при индукции частоте вт/кг		
							$p_{1,0/50}$	$p_{1,5/50}$	$p_{0,75/40}$
Э310	ХВП		0,50	60-150;	7,65	0,5 · 10 ⁻⁵	1,25	2,9	3,8
			0,35	24-150;	—	—	1,00	2,2	3,2
Э320	ХТ-18		0,50	60-150;	—	—	1,15	2,5	3,5
			0,35	24-150;	—	—	0,90	1,9	2,9
Э330	ХТ-18,5		0,50	60-150;	—	—	1,05	2,3	3,2
			0,35	24-150	—	—	0,80	1,7	2,6

Примечание: Буквы и цифры в марках стали условно обозначают:
 Э—электротехническая сталь; первая цифра—степень легирования кремнием, %;
 вторая цифра — гарантированные электромагнитные свойства стали; третья цифра (0) — означает, что сталь холоднокатаная.

10. Определение тока холостого хода

Ток холостого хода I_0 имеет активную I_{0a} и реактивную I_{0p} составляющие, связанные уравнением

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0p}^2} \text{ а.}$$

Активная составляющая тока холостого хода очень мала и ею можно пренебречь. В этом случае реактивная составляющая полностью определяет собой ток холостого хода. Обычно эту составляющую называют током намагничивания и определяют по формуле

$$I_{0p} = \frac{H_c l'_c + H_y l'_y + 0,8 B_c n \delta_3 \cdot 10^4}{\sqrt{2} \omega_1} \text{ а,}$$

где $\delta_3 = 0,004 \text{ см}$ — величина эквивалентного воздушного зазора трансформатора;

n — число зазоров в сердечнике: в однофазном стержневом трансформаторе $n=4$, в трансформаторе с вогнутым сердечником $n=2$;

H_c ; H_y — напряженность магнитного поля (удельные ампервитки) в стержне и ярме трансформатора, определяемые по кривым намагничивания для выбранного сорта стали в соответствии с индукциями B_c и B_y (см. табл. 8);

$l'_c = 2h$ — средняя длина пути магнитного потока в стержнях;

$l'_y = 2(b + a_c + h_y)$ — средняя длина пути магнитного потока в ярме.

Для трансформатора с вогнутым сердечником $B_c = B_y$; $l'_c + l'_y = l_{c \text{ ср}}$, поэтому формула для определения I_{0p} упрощается

$$I_{0p} = \frac{H_c l_{c \text{ ср}} + 0,8 B_c n \delta_3 \cdot 10^4}{\sqrt{2} \omega_1}.$$

11. Определение параметров трансформатора

Активные сопротивления обмоток

$$r_1 = \frac{P_{M1}}{I_1^2} \text{ ом}; \quad r_2 = \frac{P_{M2}}{I_2^2} \text{ ом.}$$

Активное сопротивление короткого замыкания двухобмоточного трансформатора, приведенное к первичной обмотке

$$r_k = r_1 + r'_2 = r_1 + r_2 \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2 \text{ ом.}$$

Кривая намагничивания стали Э330 (H а/см) вдоль проката

$B \text{ вб/м}^2$	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,6	0,50	0,51	0,52	0,53	0,54	0,55	0,56	0,57	0,58	0,59
0,7	0,60	0,60	0,61	0,62	0,63	0,64	0,65	0,66	0,68	0,69
0,8	0,70	0,70	0,72	0,73	0,74	0,75	0,77	0,78	0,79	0,80
0,9	0,80	0,82	0,83	0,84	0,86	0,88	0,90	0,92	0,93	0,94
1,0	0,95	0,96	0,98	1,00	1,02	1,03	1,05	1,08	1,09	1,10
1,1	1,12	1,13	1,15	1,17	1,20	1,21	1,22	1,24	1,26	1,28
1,2	1,13	1,31	1,33	1,37	1,39	1,40	1,42	1,44	1,45	1,48
1,3	1,50	1,52	1,53	1,55	1,57	1,60	1,62	1,65	1,68	1,70
1,4	1,75	1,80	1,82	1,85	1,88	1,90	1,95	2,00	2,05	2,10
1,5	2,15	2,20	2,25	2,30	2,40	2,45	2,55	2,60	2,70	2,80
1,6	2,90	3,00	3,10	3,25	3,40	3,50	3,70	3,80	4,00	4,20
1,7	4,50	4,70	5,00	5,30	5,70	6,20	6,60	7,20	7,90	8,50
1,8	9,50	10,00	11,00	11,70	12,70	13,80	15,00	16,2	17,80	20,00

Относительные активные падения напряжения в обмотках при номинальной нагрузке

$$e_{a1} = \frac{P_{m1}}{U_1 I_1} 100 \% ; \quad e_{a2} = \frac{P_{m2}}{U_2 I_2} 100 \% .$$

Относительные индуктивные падения напряжения в обмотках

$$e_{s1} = \frac{4fI_1 w_1 \delta_{s12} l_{w1} 10^{-6}}{e_w l_s} \% ;$$

$$e_{s2} = \frac{4fI_2 w_2 \delta_{s12} l_{w2} 10^{-6}}{e_w l_s} \% ;$$

$$e_s = e_{s1} + e_{s2} .$$

В этих формулах значения δ_{s12} и l_s определяют путь для потока рассеяния по ширине и высоте окна

$$\delta_{s12} = 0,2 + \frac{b_{k1} + b_{k2}}{2} \text{ см} ;$$

$$l_s \approx h \text{ см} .$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания трансформатора, приведенное к первичной обмотке

$$x_k = x_1 + x'_2 = \frac{e_s \% \cdot U_1}{100 I_1} \text{ ом} .$$

Полное сопротивление короткого замыкания трансформатора

$$z_k = \sqrt{r_k^2 + x_k^2} \text{ ом.}$$

Напряжение короткого замыкания

$$e_k = \frac{z_k \cdot I_1}{U_1} \cdot 100 \text{ \%}.$$

Величина e_k должна быть в пределах 3—6%.

Падение напряжения трансформатора при номинальной нагрузке

$$\Delta U = e_{a1} \cos \varphi_1 + e_{a2} \cos \varphi_2 + e_{s1} \sin \varphi_1 + e_{s2} \sin \varphi_2 \text{ \%}.$$

Напряжение на зажимах вторичной обмотки при номинальной нагрузке

$$U_2 = U_1 \frac{w_2}{w_1} \left(1 - \frac{\Delta U \%}{100} \right) \text{ в.}$$

Технические данные некоторых типов корабельных трансформаторов

Наименование и обозначение величин	Размер- ность	OCB —0,25/0,5	OCB— —0,5/0,5	OCB— 1/0,5	OCB — 2,0/5	OCB — 3/0,5	OC3 —3,0/5	OC3 —5/0,5	OC3— 7/0,5	OC3— —10/0,5
Мощность S_2	к $ва$	0,25	0,5	1,0	2,0	3,0	3,0	5,0	7,0	10,0
Напряжение U_1	$в$	230	230	230	230	230	230	230	400	400
U_2	$в$	25	25	25	25	25	25	25	133	133
Ток I_1	$а$	1,135	2,27	4,55	9,1	13,64	13,64	22,7	18,4	26,3
I_2	$а$	10	20	40	80	2×60	2×60	2×100	2×26,3	2×37,6
Напряжение на витках e_w	$в/виток$	0,532	0,782	1,04	1,667	1,136	1,085	1,47	1,66	1,93
Число витков w_1		432	294	221	138	202	212	156	241	207
w_2		47	32	24	15	22	23	17	80	69
Сечение меди q_1	$мм^2$	0,581	1,23	2,776	8,36	11	11,9	15,1	8,3	12,8
обмоток q_2	$мм^2$	(6,65)	(10,5)	(4×7,12)	(3×16,3)	2(2×18,9)	2(2×12,9)	2(2×22)	2(15,1)	2(18,9)
Размеры меди обмоток BH	$мм$	Ø0,85	Ø1,25	Ø1,88	1,68×5,1	2,26×5,1	2,1×5,9	3,05×5,1	1,81×4,7	2,28×5,9
HH	$мм$	1,56×4,4	1,18×5,9	1,56×4,7	2,44×6,9	3,28×5,9	2,44×5,5	3,28×6,9	3,05×5,1	3,28×5,9

Наименование и обозначение величин	Размер- ность	OCB— —0,25/0,5	OCB— —0,5/0,5	OCB— —1 0,5	OCB— —2 0,5	OCB— —3/0,5	OC3— —3,0,5	OC3— —5,0,5	OC3— —7,0,5	OC3— —10/0,5
Плотность	δ_1	1,95	1,84	1,64	1,09	1,24	1,15	1,5	2,22	2,05
тока	δ_2	1,5	1,9	1,4	1,64	1,59	2,32	2,26	1,74	1,99
Ток холостого хода	I_0	17	16	12	12	10,4	11	8	9,2	8
Потери в	P_{m1}	7,5	9,9	17,7	14,2	28	25,5	47,5	136	148
меди	P_{m2}	4,26	8,0	11,0	29,8	53	74	99	72	113
	P_k	11,8	17,9	28,7	44	81	99,6	146	208	261
Потери холостого хода	P_0	7,2	11,5	18	33	41,6	38,6	54	77	99
К. п. д.	η	93,0	94,5	95,6	96,0	96,1	95,6	96,2	96,3	96,5
$\xi = \frac{P_k}{P_0}$	—	1,64	1,56	1,6	1,33	1,95	2,57	2,71	2,71	2,65
Падение напря- жения	ΔU	4,7	3,53	2,87	2,45	2,7	3,3	2,93	2,98	2,61
Напряжение ко- роткого замыка- ния	e_k	4,76	3,86	3,21	3,68	3,11	3,66	3,32	3,65	3,1
Сопротив-	r_1	5,8	1,92	0,855	0,172	0,152	0,137	0,092	0,4	0,214
ления актив-	r_2	0,0426	0,02	0,0069	0,00465	0,00375	0,00515	0,00248	0,02	0,0207
ные	r_k	9,45	3,62	1,437	0,567	0,472	0,573	0,30	0,636	0,404
Индуктивное сопротивление короткого замыкания	x_k	1,74	1,48	0,73	0,73	0,223	0,22	0,146	0,474	0,208

Наименование и обозначение величин	Размер- ность	OCB— —0,25/0,5	OCB— —0,5,0,5	OCB— —1,0,5	OCB— —2,0,5	OCB— —3,0,5	OCB— —5,0,5	OCB— —7,0,5	OCB— —10,0,5
Полное сопротивление короткого замыкания Z_k	ом	9,65	3,9	1,62	0,93	0,523	0,615	0,337	0,472
Э.д.с. рассеяния e_s	%	0,86	1,45	1,45	2,75	1,32	1,3	1,44	1,36
Индукция в стержне B_c	мл	1,485	1,52	1,53	1,565	1,31	1,345	1,315	1,395
Размеры сече- ния стержня a_c	мм	36	52	58	74	61	56	61	73
Размеры b_c	мм	56	56	66	81	71	72	92	95
Размеры h	мм	80	80	85	85	185	170	185	270
Размеры b	мм	37	37	50	61	59	64	59	67
Размеры h	—	2,17	2,17	1,7	1,4	3,14	2,66	3,14	4,0
Размеры b	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Сечение стержня S_c	см ²	16,2	23,2	30,6	48	39	36,3	50,5	62,3
Изоляци- онные Δh	мм	20	20	21	21	30	26	30	30
проме- жутки Δb	мм	19	20	16	15	30	32	31	35
Линейная нагрузка AS	а.с.м	160	210	310	380	175	195	225	220
Вес стали G_c	кг	3,53	5,4	8,25	14,6	21,7	19,1	28,1	45,7
Вес меди G_m	кг	1,49	2,2	4,69	8,85	15	12,75	15,55	24,4
$G_c + G_m$	кг	4,02	7,6	12,94	23,45	36,7	31,85	43,65	70,1
$\alpha = \frac{G_c}{G_m}$	—	2,37	2,45	1,75	1,65	1,45	1,5	1,8	1,87
Полный вес тран- сформатора	кг	12,9	18,1	25,3	40,6	73	58,7	72,0	118

ЗАДАНИЕ

на расчетно-графическую работу

Курсанту _____ класса тов. _____

Вариант задания № _____ (по табл. 10)

1. Тема: Расчет однофазного трансформатора с воздушным охлаждением.

2. Учебная цель. Закрепить и углубить теоретические знания, полученные на лекциях, овладеть методикой расчета корабельных трансформаторов с воздушным охлаждением.

3. Отводимое время: 6 часов.

4. Расчетно-графическая работа должна содержать:
заполненный формуляр расчета с соответствующими объяснениями и обоснованиями;

эскиз магнитопровода и расположения обмоток трансформатора (продольное и поперечное сечение);
схему соединения обмоток.

5. Срок выдачи задания _____

6. Срок выполнения задания _____

7. Перечень литературы (приведен в конце руководства).

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. П. Ермолин и А. П. Ваганов. Расчет маломощных трансформаторов. Госэнергоиздат, 1957.
2. И. И. Белополский, Л. Г. Пикалова. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности. Госэнергоиздат, 1963.
3. М. П. Костенко и Л. М. Пиотровский. Электрические машины. Часть I, Госэнергоиздат, 1958.
4. И. М. Постников. Проектирование электрических машин. Гостехиздат УССР, 1960.
5. Водозащищенные и брызгозащищенные трансформаторы с воздушным охлаждением (описание и инструкция по монтажу и эксплуатации). Московский электрозавод им. В. В. Куйбышева, 1961.
6. Ю. П. Коськин. Упрощенный расчет трансформаторов. Учебное пособие ВВМИОЛУ им. Дзержинского, 1961.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие :	3
Методика расчета трансформатора	4
1. Исходные данные для расчета	4
2. Основные сведения по устройству трансформаторов	4
3. Определение токов.	7
4. Выбор индукции в сердечнике и плотности тока в обмотках	9
5. Определение сечений стержня и ярма сердечника	10
6. Определение числа витков и сечения проводов обмоток.	12
7. Укладка обмотки на стержнях	17
8. Определение веса активных материалов	21
9. Определение потерь и к. п. д.	22
10. Определение тока холостого хода	24
11. Определение параметров трансформатора	24
Приложение 1.	27
Приложение 2.	30
Литература	31

Рэм Павлович Просужих

РАСЧЕТ ОДНОФАЗНЫХ КОРАБЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Литературный редактор *О. К. Иродова.*

Тех. редактор *И. С. Мажуга.*

Корректоры *А. Т. Рябинина, Ф. Е. Райкина.*

Сдано в производство 26.06.64 г.
Формат бумаги 60×90¹/₁₆.

Подписано к печати 2.10.64 г.
Объем 2 п. л., 2,4 усл. п. л.

ГМ 573723.

Зак. 370.

Продаже не подлежит